

Proporción y estructura en los edificios civiles del Renacimiento

Miguel Angel Cobreros Vime

En el presente estudio se analizan determinados cambios en el diseño y en el dimensionado de las estructuras murales de la Arquitectura civil del Renacimiento. Estas innovaciones están directamente influenciadas por la introducción del Orden arquitectónico tomado en su sentido mas amplio. En este análisis se propone un campo limitado espacial y temporalmente a la arquitectura del sur de Europa en el período 1470/1570, donde podemos encontrar los ejemplos de mayor influencia.

Primeramente vamos a definir cuales son los cambios fundamentales en el diseño de la estructura, estudiándolos en alzado, sección y planta, a partir de asumir la propuesta clásica de los órdenes como mecanismo de control. Posteriormente se analiza la cuestión de la proporcionalidad a partir de la idea albertiana de considerar el organismo edificatorio como un todo armónico con sus partes.

La investigación parte de asumir el alto grado de coincidencia entre el tipo arquitectónico y el tipo estructural: en las estructuras de muros se puede cambiar la apariencia mediante la ornamentación pero la tipología arquitectónica coincide con la estructural, por ejemplo el tipo basilical solo tiene dos grados de libertad respecto a la estructura: adintelado o abovedado tanto para los muros como para el techo. En una palabra la planta no es libre.

En el diseño de los muros, la ornamentación aplicada, si existe, tiene que respetar determinadas condiciones en el tamaño y disposición de huecos. Si el muro soporta empujes, su relación hueco-macizo, es

un factor importante pues influye en el peso propio, que es el factor determinante para la estabilidad de muros soportes de bóvedas.

ORIGEN ESTRUCTURAL Y FUNCIÓN VIRTUAL

La influencia de los órdenes en el diseño de los muros de fachada se debe a su origen estructural, se trata de una ornamentación de origen tectónico. Los mecanismos de control se establecen a través de la regularidad y la función virtual. Esta última se deriva de la necesidad estética de mantener las relaciones mecánicas originales en el nivel de la apariencia sensible y tiene unas importantes consecuencias.

La función virtual no es un resultado de investigaciones recientes, ya Palladio imponía a la decoración de columnas, pilastras y entablamentos la función de revelar la estructura real que hay detrás. El clasicismo francés del XVII y la los tratados de la Ilustración abundan en esta idea. Sobre el muro de fachada se proyecta el pórtico clásico de modo que las proporciones originales se mantienen con ligeras variantes. El muro resultante se puede entender como una serie de soportes murales, separados por huecos y por zonas murales de arriostramiento entre ellos.

El muro soporte de la ornamentación clásica puede ser continuo o con soportes entregados tal como lo entendía Alberti, en este caso los soportes o núcleos duros murales coinciden con la trama de los órdenes y en el primero solamente se puede imponer la coin-

cidencia de entablamentos y niveles de piso. Esto último es importante pues lleva a la identificación típica del clasicismo de orden y planta, propuesta por primera vez de forma explícita en el tratado de Serlio.

MODIFICACIONES EN EL DISEÑO

Fachadas Portantes

La aplicación de los órdenes sobre la superficie mural tiene siempre características positivas desde el punto de vista estructural. La concepción por plantas garantiza una correcta relación entre forjados y/o bóvedas con el muro, es decir supone una sección regular. La distribución regular de huecos supone la homogeneidad en la relación h/m y por ende en el peso propio estabilizador. Sujetar al muro a unas reglas de proporciones externas pero positivas influye en la estandarización de soluciones en las que el espesor mural queda como variable independiente.

Todo ello conduce a que el muro de fachada pueda ser plenamente ornamental sin perder capacidades portantes. Es decir que la reflexión decorativa sobre la base de los órdenes no perjudica la capacidad estructural sino que la racionaliza. Desde el punto de vista contrario podemos pensar en fachadas portantes sabiendo que no vamos a entrar en conflicto con el ornamento. De hecho en muchos edificios construidos por Sangallo el Joven no se implementa el orden a nivel decorativo, basta la regularidad en la superposición de plantas y en la distribución de huecos. El paso de muros de fachada no portantes a las fachadas ordenadas que soportan crujías se puede idealizar en un itinerario regular, Palacio Medici, Palacio Strozzi, Palacio Farnesio.

Esta cuestión es decisiva en las propuestas de estructuras murales, la fachada clásica es un elemento de gran capacidad portante y de contención de empujes. Su capacidad estructural queda definida por la relación h/m, por el espesor del muro y por la esbeltez. Puede incluirse en una estructura de muros paralelos formando crujías estables. Además hay que indicar su neutralidad frente a la solución de crujía que puede ser abovedada o adintelada permaneciendo la apariencia del muro y variando solamente el espesor. En la época impuesta en este estudio el muro de fachada soporta crujías abovedadas de seis a nueve metros, con relaciones c/L en el entorno del sexto de la luz. En la tabla 1 se resume las relaciones comentadas a partir de los datos de veinticinco edificios de la época, y en la tabla 2 se dan las mismas relaciones individualizadas por ejemplos.

La obtención de muros ornamentales y portantes en sí mismos, no solo ocurre en los alzados exteriores, también las arquerías de patios aumentan su capacidad al pasar a ser arquerías murales. Estas arquerías se obtiene a partir de la proyección del orden sobre un muro con huecos arqueados. Es un elemento perfectamente definido en los tratados de la época, cuya relación h/m se sitúa en el entorno de 0.5. En la tabla 1 se resumen los datos de este elemento.

En la figura 1 podemos observar un ejemplo de muro de fachada correspondiente al palacio de Carlos V de Granada.

Síntesis en Sección

Anteriormente se ha comentado la cuestión de la identificación de orden y planta, que influye en el diseño de secciones regulares. Los tipos de secciones

Tabla 1

H/M	S/H	S/D	Esbeltez Fr.	Esbeltez Tr.	C/D	C/L Síntesis	C/L Adintel
0.10-0.18	1.2-2.5	2-5	2.5-5	7-10	0.66-2	0.12-0.18	0.08-0.12

H/M	S/H	S/D	Esbeltez Fr.	Esbeltez Tr.	C/D	C/L Síntesis	C/L Adintel
0.48-0.56	0.36-0.55	2-2.5	6-6.5	7-10	1-2	0.21-0.25	0.08-0.12

Tabla 2

EDIFICIO	ARQUITECTO	TIPO TECHO Y LUZ DE CRUJÍA	F/L	ESBELTEZ.T	C/L	H/M
P.FARNESIO	A.SANGALLO	AB+AD+AD.-11.30	0.30	9	0.10	0.12
P.FARNESIO.PAT	A.SANGALLO	AB+AB+AB.-5.50	0.50	10	0.20	0.46
P.CARLOS V	P.MACHUCA	AB+AD -7.50(zaguanes)	0.27	9.5	0.20	0.17
P.CANOSSA	SANMICHELE	AB+AD -8.80	0.42	8.5	0.15	0.14
P.POMPEI	SANMICHELE	AB+AD -6.80	0.35	10	0.13	0.25
P.CONSERVAD.	MIGUEL ANG	AD+AD -8.80	/	8.5	0.15	0.59
B.SAN MARCOS	SANSOVINO	AB+AD -11.0	0.30	11	0.09	0.45
P.THIENE	PALLADIO	AB+AD -6.40	0.50	11	0.11	0.14
P.THIENE.PAT	PALLADIO	AB+AB -4.20	0.50	11	0.21	0.62
P.PORTO	PALLADIO	AB+AD -7.00	0.50	9	0.11	0.18
P.CHIERICATI	PALLADIO	AD+AD -11.2	/	11	0.16	0.67
P.FARNESIO	VIGNOLA	AB+AB+AD.-8.40	0.26	7	0.19	0.11
P.FARNESIO.PAT	VIGNOLA	AB+AB -4.20	0.26	12	0.25	0.40
C.LONJA	HERRERA	AB+AB -8.40	0.33	7	0.18	0.10
C.LONJA.PAT.	HERRERA	AB+AB -5.80	0.50	7	0.21	0.55

encontradas son de dos clases: totalmente adinteladas o bien plantas bajas abovedadas con plantas superiores adinteladas. El alejamiento de los muros traveseros debido al diseño de salas con proporciones en plantas dobles o triples de la luz por un lado y la poca efectividad de estos muros frente a empujes interiores, cuestión que podemos ver en la figura 2, hace que podamos estudiar las proporciones de la estructura y su equilibrio en la sección, solamente añadiendo el dato de la relación h/m.

En los casos de crujías abovedadas se produce una notable optimización del espesor mural debido al peso propio de plantas superiores sin empujes, mecanismo que definimos como síntesis en sección.

Para comprobar esta optimización es suficiente comparar el espesor necesario en naves abovedadas de una planta con el que se necesita, en las mismas condiciones de proporción de crujía, relación h/m y materiales para secciones sintéticas de dos plantas. Se pasa de un espesor entorno al tercio de la luz, a un espesor entorno al sexto, y como veremos posteriormente sin alcanzar tensiones medias excesivas en la base del muro.

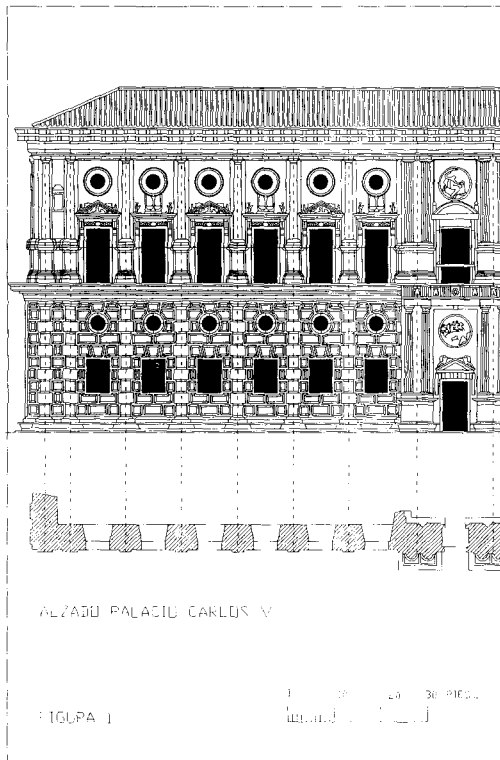
La proporción en sección es un asunto muy analizado en los tratados de la época, Alberti y Palladio la deducen de las dimensiones de las salas principales en planta y prescriben proporciones H/L en el intervalo 1-2, en la práctica el entorno se reduce al intervalo 1-1.33 para las crujías principales que inducen proporciones en el intervalo 1.5-3 para las crujías de patio.

La altura de planta se encuentra en el mismo intervalo de la luz de crujía: seis/nueve metros. Esto conduce a esbelteces entre siete y diez, como hemos visto en la tabla 1.

En la figura 3 podemos ver la sección del Palacio Thiene de Palladio donde es posible observar como se produce la identificación de orden y planta, la regularidad de la sección y el concepto de caja mural obtenida por superposición de plantas.

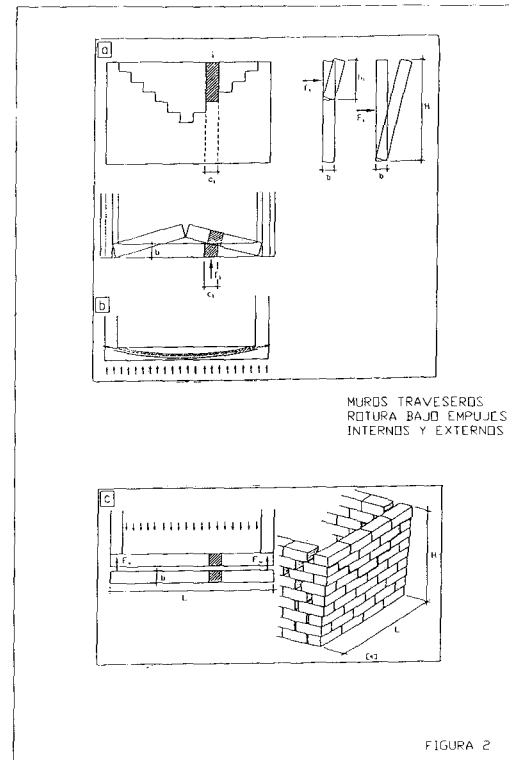
La Planta Regular

La propuesta de Alberti, asumida por Palladio de coordinar los órdenes con el sistema constructivo, es



decir de conectar estructura y decoración tiene como consecuencia la regularidad de la organización en planta. Si en sección tenemos naves apiladas, en planta tenemos crujías agregadas, organizadas según polígonos regulares siempre que las condiciones de parcela lo permitan.

La organización regular que en algunos casos llega a definir la planta mediante el abatimiento de los órdenes del alzado, establece una coordinación entre elementos estructurales verticales y horizontales en puntos preestablecidos. Esta tipo de regulación evita efectos secundarios en la estructura, facilita las compensaciones de empujes, es evidentemente positiva respecto a esfuerzos sísmicos etc... Al mismo tiempo la distribución de cargas es muy homogénea, se distribuye en planos horizontales, los muros las transportan verticalmente debido a la superposición de huecos etc.. Esta homogeneidad supone la compatibilidad de deformaciones. En la figura 4, podemos ver la planta de La Lonja de Herrera, edificio donde el control de los órdenes es total en la disposición de los elementos constructi-



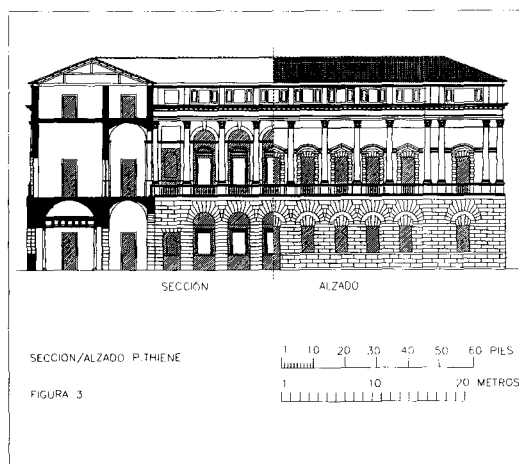
vos y en el que se puede observar con claridad la organización por crujías.

DIMENSIONADO Y PROPORCIÓN

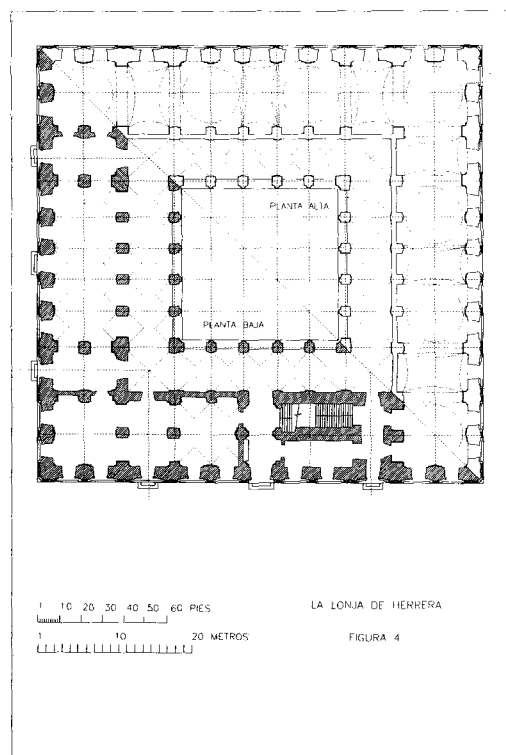
Proporción Generalizada

La idea de construir con los elementos relacionados entre sí y con referencia a la totalidad del edificio, definida por los teóricos renacentistas como armonía, eutritmia o simetría lleva a la cuestión de una unidad modular que gobierne el diseño. En la estructura esta idea tropieza con un módulo, el del orden, basado en el dimensionado de un sistema adintelado. Es posible dimensionar secciones adinteladas basando la esbeltez del muro en el módulo del orden asociado, sin embargo no es posible dimensionar de esta manera crujías abovedadas.

El primer tratadista, Alberti, tropieza en esta cuestión y por un lado relaciona el espesor mural con el diámetro de la columna asociada y por otro utiliza



fórmulas racionales, diferenciando de manera correcta entre sistemas adintelados donde emplea la esbeltez puesto que el problema principal es el viento y sistemas abovedados donde emplea la fórmula racio-



nal en función de la luz aunque solo para naves de una planta.

La formulación basada en igualar el espesor mural, flechas en bóvedas o espesores en las mismas con una fracción de la luz de crujía es el remanente posible de la idea de proporción generalizada. Significa que la relación c/L , se considera independiente de la luz.

Dimensionado Fraccional

El dimensionado fraccional, no distingue entre relaciones F/L , quizá debido a la idea de la superioridad del semicírculo como directriz de las bóvedas. Tampoco tiene en cuenta las proporciones en sección, ni las variaciones de h/m en el muro.

Es evidente que la idea de proporción tomada así contradice la ley cubo/cuadrado de Galileo, aunque también es verdad que dicha ley puede ser eludida cuando el problema de dimensionado no es el de la resistencia de la sección.

El problema de estabilidad es mas importante que el de resistencia en las cajas murales de la época, sobre todo cuando son abovedadas. Los espesores necesarios para equilibrar la sección garantizan bajos niveles tensionales, considerando la tensión media en la sección. Se trata en definitiva de utilizar la energía gravitatoria de las masas, para equilibrar los empujes, de modo que el descentramiento de las resultantes de peso propio produzca un par centrador que equilibre el momento de vuelco.

Es pues un problema de geometría y proporciones que se puede resolver gráficamente, dibujando las líneas de empujes y comprobando que estas se mantienen dentro de la geometría del muro y de las bóvedas. Al ser un problema de este tipo la idea de dimensionar proporcionalmente no está fuera de lugar, y es mas adecuada a un tipo de diseño que basa el dimensionado en fracciones de la luz de crujía para el espesor mural, espesor de las bóvedas y flechas de las mismas. Todo ello en el marco de secciones que procuran mantener unas determinadas relaciones entre altura y luz.

Es evidente que el espesor del muro se muestra muy sensible a las variaciones de proporción H/L , debido al aumento del brazo volcador y mas aún a las variaciones de F/L .

Las variaciones en h/m modifican el peso propio estabilizador y la mayor o menor resistencia del ma-

terial permiten mayores descentramientos de la resultante, puesto que el peso es resistido por un residuo de la sección cobaricéntrico con la resultante de cargas verticales.

La línea de empujes en el interior de la bóveda es indefinida, aunque siempre podemos considerar la de máximo empuje.

En definitiva todos estos factores limitan la validez de la formulación fraccional.

Casos de c/L constante

Podemos fijar los valores anteriores y estudiar los espesores murales en función de la luz para cada caso. En este análisis se fija el peso propio de la obra de fábrica en 2 ton/m³. Se estudia dos tipos de muros: los muros de fachada con relaciones h/m 0.1, que se corresponden con las fachadas urbanas y las arquerías murales de patio, en algunos casos también exteriores, que suelen tener su relación h/m en torno a 0.5. Las bóvedas consideradas son de directriz circular con relaciones F/L entre 0.2 y 0.5. Las secciones estudiadas son de dos plantas, sintéticas con proporciones H/L 1/1 y 1.5/1. Se ha considerado al muro de una sola hoja y por lo tanto homogéneo, lo cual puede suponer que los espesores obtenidos sean bajos, sin embargo esta limitación no invalida el análisis de la proporcionalidad.

Para considerar los empujes se ha utilizado una formulación basada en una distribución de cargas parabólica aproximada a la existente en este tipo de secciones que produce una línea de empujes parabólica muy rebajada, que se adapta especialmente a la directriz circular cuando la distribución de cargas disminuye desde los extremos a el centro. Esta formulación de tipo elástico nos permite obtener un valor para los empujes en función de F , Q , L .

Con estas limitaciones la formulación racional es válida. Los momentos de vuelco crecen con el cubo de la luz, igualmente que los momentos centradores. Resulta posible establecer una ecuación de equilibrio en la base del muro.

Si llamamos p al factor de peso propio del muro, q al factor de peso propio de la bóveda y r al factor de empujes dependiente de la flecha y de la proporción H/L , tenemos en primera instancia, para un elemento unitario de sección:

$$pLc^2 + qL^2c - rL^3 = 0$$

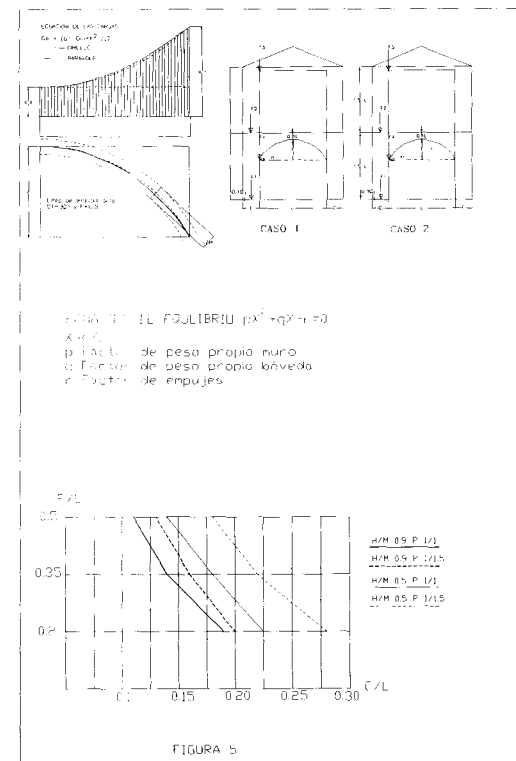
dividiendo por L^3 y llamando X a la relación c/L queda

$$pX^2 + qX - r = 0$$

Por lo que en estas condiciones es posible definir una relación c/L constante e independiente de la luz para cada caso estudiado, cuyo resumen vemos en la figura 5. La única limitación es el nivel tensional que crece linealmente con la luz y que en los casos estudiado varían entre 0.5 y 4 kg/cm² de tensión media para el entorno de luz cinco/diez metros. Esta tensión media se puede poner en función de c y L :

$$\text{Tensión media por ml} = pL + qL^2/c \text{ (ton/m}^2\text{)}$$

De los tres factores, el debido a la bóveda tiene menor importancia en el resultado, su aportación se sitúa entre un cinco/diez por ciento para las relaciones h/m bajas y entre un diez/quince por ciento para las arquerías, por lo que para ciertos casos de F/L y



h/m bajas es posible simplificar la ecuación de equilibrio eliminando el factor q, entonces:

$$X = (r/p)^{1/2}$$

Los otros dos factores tienen la misma importancia, una reducción de peso propio pasando de muro a arquería es equivalente a una reducción de flecha en la bóveda de 0.5 a 0.2 o un cambio en la proporción de unitaria a sesquialtera.

La reducción de h/m lleva a mayores espesores y menores valores tensionales. Los espesores calculados para los muros de fachada están en el entorno 0.10/0.20 de la luz y para las arquerías en el entorno 0.15/0.25. Traduciendo estos valores a esbelteces el valor máximo que se obtiene es once para el caso de proporción 1.5/1, h/m igual a 0.1 y F/L igual a 0.5.

CONCLUSIONES

El pretendido abandono de la reflexión estructural de la arquitectura civil renacentista no es tal, si bien no se busca el logro estructural aparente. El record se cambia por la optimización y la racionalidad que aporta la regularidad y la idea de proporción generalizada y de interrelación entre las partes, en este sentido hay que matizar que el óptimo clásico significa la elección de lo mas adecuado en función del diseño en su conjunto. Hemos visto rápidamente lo que considero mas importante en cuanto a los cambios de metodología en arquitectura civil. Fachadas portantes ornamentales en sí mismas, aprovechamiento del peso propio en vez de compensaciones de empujes, concepción por plantas y por crujías. La formulación empírica de tipo fraccional inaugura un camino de dimensionamiento basado en la experiencia, en el modelo construido que se puede extrapolar, método propio de la arquitectura de la época del clasicismo.

BIBLIOGRAFÍA

Alberti, L.B., *Los diez libros de Arquitectura de León- Baptista Alberti* traducidos del latín por J. Fresnillo. Madrid, 1991

- Benedetto, C., *Conservazione edilizia e tecnologia del Restauro*. Roma, 1992.
- De Miguel J. L., Muros, artículo publicado en el curso de Restauración de la Universidad de Valladolid. Valladolid, 1992.
- Di Pasquale, D., «Questions concerning the mechanics of masonry». *Stable-Unstable? Structural Consolidation of ancient Buildings*, editado por R.M. Lemaire y K. Van Balen. Leuven: Leuven University Press 1.
- García Tapia, N., *Ingeniería y Arquitectura en el Renacimiento*. Valladolid, 1990.
- Guindal-Lafarga, A., *Los modelos estructurales antiguos. Evolución y aportaciones en los métodos y análisis*. Curso de Restauración del COAM. Madrid, 1987
- Heyman, J., *Teoría, Historia y Restauración de Estructuras de Fábrica*. Madrid, 1995
- Lozano G, A., *Reestructuración de edificios de muros de fábrica*. Gijón, 1995.
- Palladio, A., *Los Cuatro Libros de Arquitectura*. Traducción de A.Martínez Crespo. Madrid, 1988
- Serrano Cerezo, E., «La técnica del Humanismo» *RTI* enero-febrero de 1977.
- Summerson, J., *El Lenguaje Clásico de la Arquitectura*. Barcelona, 1991.
- Szambien, W., *Teoría y Terminología de la Arquitectura en la Época Clásica*. Madrid, 1993.
- Wittkower, R., «La Proporción en el arte y en la arquitectura». Artículo publicado en 1955 y recogido en *Fundamentos de La Arquitectura en la edad del humanismo*. Madrid, 1995.

GLOSARIO

- Relación Hueco-Macizo h/M.
- Relación Flecha-Luz F/L.
- Relación Espesor-Luz c/L
- Altura de planta H.
- Proporción en sección H/L.
- Anchura de soporte mural s.
- Módulo del Orden D.
- Anchura de Hueco b.
- Esbeltez H/c.